

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究 (A)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18685024  
 研究課題名（和文） 超高速・パラレル光インターコネクションを実現するポリマー並列光導波路の作製  
 研究課題名（英文） Fabrication of polymer parallel optical waveguide enabling high-speed and parallel optical interconnection  
 研究代表者  
 石樽 崇明 (ISHIGURE TAKAAKI)  
 慶應義塾大学・理工学部・准教授  
 研究者番号：00291162

## 研究成果の概要：

本研究では、超高速並列光インターコネクションを実現する新規「屈折率分布 (GI) 型円形コアポリマー並列光導波路」の試作及び性能評価を行った。この GI 型円形コアポリマー並列光導波路は、光ファイバ、平板導波路の長所を兼ね備えた通信デバイスとなる。本研究にて、この新規導波路設計仕様を確立し、光インターコネクション仕様に基づく、通信距離 0.1~100m、通信速度 10~40Gbps、4~16 チャンネルの並列伝送を実現するポリマー並列光導波路の試作に成功した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2007 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2008 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
年度			
年度			
総計	17,600,000	5,280,000	22,880,000

## 研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料化学，機能材料・デバイス

キーワード：光学材料・素子，ポリマー光導波路，光インターコネクション

## 1. 研究開始当初の背景

音声、高精細画像など、インターネットを介して授受されるデータ量の飛躍的な増大により、トラフィックの集中するスイッチ、サーバ内の信号処理速度がボトルネックになりつつある。この信号処理速度改善にむけ、バックプレーン、ボード間はもとより、ボード内、さらにはチップ間、チップ内のインターコネクションの光化がかねてより提案されてきている。しかしながら、本研究開始当初は、コストと通信性能のバランスから、未だ電気インターコネクションが主流となっ

ていた。一方で、石英系光ファイバリボンを用いた並列光インターコネクションの研究開発が、主に北米の企業、研究機関を中心に進められており、特に、北米では Fiber To The Chip 構想に基づく研究開発が注目されていた。さらに、より高密度化を目指すために、平板ポリマー光導波路を用いた検討もなされていたが、ポリマー導波路特有の高伝送損失、ならびに、モード分散による伝送速度限界の影響を受けていた。これは、当時、光インターコネクション用途として検討されていた平板ポリマー光導波路が、すべて矩形で

「均一屈折率」を有する SI 型コアを用いたものであったためである。

## 2. 研究の目的

本研究では、超高速並列光インターコネクションのための新規ポリマー光導波路を実現することを目的とした。本研究で作製するポリマー光導波路は、光ファイバ、平板導波路の長所を兼ね備え、より高速化、より長距離化の通信性能要求に対応可能なデバイスとなるものである。

最終的には、素子のコンパクト性が最重要視される、Fiber To The Chip 構想を視野に入れ、シングルモード導波路の試作を行う。光インターコネクション仕様の主流と考えられる、通信距離 0.1~100m, 通信速度 10~40Gbps, 4~16 チャンルの並列伝送を実現するポリマー並列光導波路を本研究にて実現する。

## 3. 研究の方法

新規屈折率分布(GI)型ポリマー並列光導波路は、GI 型プラスチック光ファイバ (POF) の作製方法を応用したプリフォーム法を用いた。具体的には、ポリメタクリル酸メチル (PMMA) を母材とし、4~16 (最大) 本の並列コア部 (チャンネル部) に高屈折率ドーパントを添加することで屈折率分布を付加する。プリフォーム作製時のチャンネル形状、配列、ならびに加熱延伸する際の延伸比率を調整することで、コア形状を自在に変えることができ、さらには、任意のコアサイズ、コア間ピッチを有する導波路を作製することが可能である。

これらの導波路パラメータ設計を行う際に、一つのコアから隣接コアへの、「クロストーク」が問題となる。新規並列光導波路作製にあたり、このクロストークによる伝送性能劣化を生じないための、「最適コア径」、「最適開口数」、「最近接コア間距離」の設計を行った。

## 4. 研究成果

図 1 に、実際に作製された GI 型円形コア導波路及びその端面写真を示す。本研究開始直後は、導波路の作製方法が確立されていなかったこともあり、(a)の様に外形が楕円形状となっていたが、円形のコアが 4 チャンネル、並列に配列されていることがわかる。その後板状のプリフォームを作製する技術が確立され、(c)、(d)の様な、長方形断面を有し、基板への埋め込み実装性にすぐれる導波路の作製が可能になった。プリフォームの延伸条件を調整することで、コア径、ピッチ (コア間距離) を自在に変化させることが可能であり、既存の矩形、均一屈折率コアポリマー導波路と同じ 50 $\mu\text{m}$  径のコア、さらにはシング

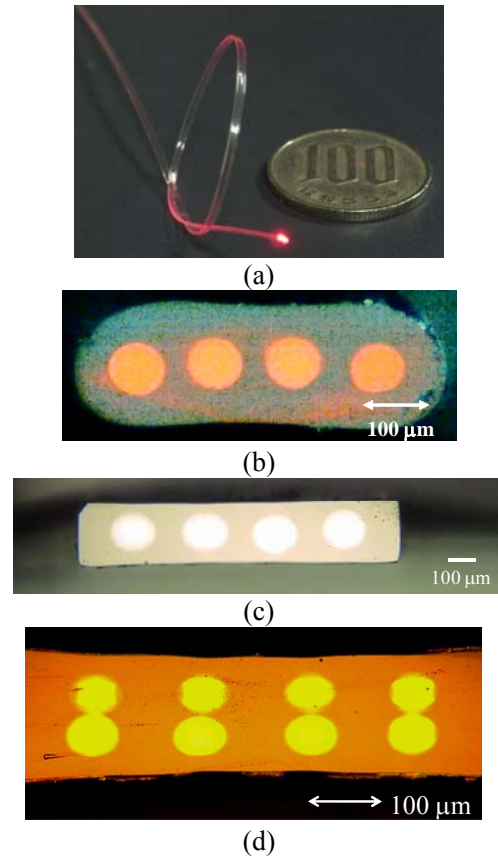


図 1 (a)本研究で作製した円形 GI 型コアポリマー並列光導波路, (b)~(d): 断面形状及び並列コア数の増加検討結果

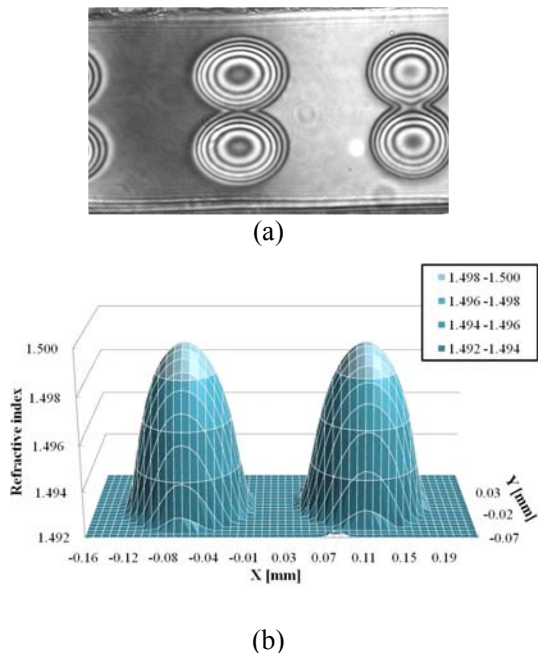


図 2 (a)二光束干渉顕微鏡にて測定した屈折率分布型ポリマー並列導波路断面の干渉縞及び (b) 干渉縞から計算された 2 チャンネルの屈折率分布

ルモード化の屈折率分布を実現する 10 $\mu\text{m}$  径のコアを有するポリマー並列導波路の作製が可能となることを確認した。

一方、コア部に形成された屈折率分布に関しては、図 2 に示すとおり、干渉顕微鏡を用いて評価を行った。図 2(a)に示されるように、同心円状の干渉縞パターンが観測され、コア部に放物線状屈折率分布が形成されていることがわかる。得られた干渉縞から算出された屈折率分布を図 2(b)に示す。モード分散を最も低減できる理想形状に近い屈折率分布が形成されていることが明らかとなった。これまで報告されてきた均一屈折率(SI)型光導波路は、コアクラッド界面での全反射により、光信号が伝搬され、コア全体に均一な出射光強度分布を示す。従って、全反射時の過剰な光損失を低減するため、導波路作製行程(リソグラフィやインプリンティング)においてコアクラッド界面を、できる限り平滑化する技術が求められてきた。また、バックプレーンへの導入時、既存の円形コア(マルチモード)光ファイバとの接続が想定されるが、その接続点でのモードフィールドのミスマッチによる接続損失も懸念されている。

これに対して、GI 型コアをポリマー光導波路に導入することの最大の利点は、伝搬光の閉じ込め効果である。放物線状の屈折率分布により、伝搬光はコア中心に強いピークを有する強度分布を示す。試作した GI 型円形コアポリマー導波路の 1 つのコアからの出射ニアフィールドパターン(NFP)を図 3 に示す。図内の白色点線で示した形状は、コアクラッド界面を示している。この結果から、GI 型屈折率分布により、出射光はコア中心に強く閉じ込められた形状となっており、コアクラッド界面の影響が小さいことが分かる。この光閉じ込め効果により、伝送損失に対するコアクラッド界面の影響を低減でき、容易に低伝送損失化が可能となる。実際に、波長 850nm において、0.028dB/cm、980nm では、0.061dB/cm の伝送損失値が得られており、これは、材料固有の伝送損失の理論限界に近い値である。

また、光ファイバの研究開発の歴史の中で

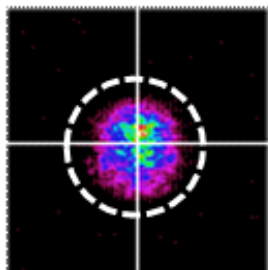


図 3 GI 型円形コアポリマー導波路の 1 つのコアからのニアフィールドパターン。点線はコア-クラッド界面

すでによく知られているように、放物線状の屈折率分布によって、モード分散を低減し、均一屈折率の SI 型導波路に比べて、高速通信が可能となる。光インターコネクションの領域では、光信号伝送距離が 1m 以下となる応用例が多く、これまで、ポリマー光導波路に関して、あまり高速性(導波路のモード分散)は、懸念事項ではなかった。これに対して、本研究で試作した、GI 型円形コアを有するポリマー並列光導波路では、1 チャンネルにより、12.5Gb/s-3m の伝送が可能であることが確認された。実際に伝送実験を行った際のアイパターンを図 4 に示す。従来の矩形コア SI 型光導波路が、フォトリソグラフィなどによる作製工程をとるために、3m 長の導波路を得る事が困難だったことや、損失、帯域面などから、これまでは、10Gb/s 以上の信号を 1m 伝送した例が最大のビットレート・距離積の記録であったが (IBM 社による報告例)、本研究で作製した GI 型ポリマー並列光導波路により、さらにその記録が更新された。上述の通り、光インターコネクション応用を考えると、この様な数 m 以上の伝送距離実現の必要性は少ないが、この低伝送損失、広帯域性により、通信機器筐体内光リンクの設計の自由度が増すと言える。さらに本研究で得られた最大並列チャンネルの全 16 チャンネルに対して 12.5Gb/s 並列伝送を行うことで、12.5 $\times$ 16 = 200 Gb/s のスループットが得られることになる。昨今の 850nm 帯の光源、受光器は、20Gb/s の送受信を可能にしつつあり、16 チャンネルで 300Gb/s、64 チャンネルの並列化を実現すれば、Tb/s のスループットが十分可能になり、光インターコネクション分野に与えるインパクトは極めて大きい。

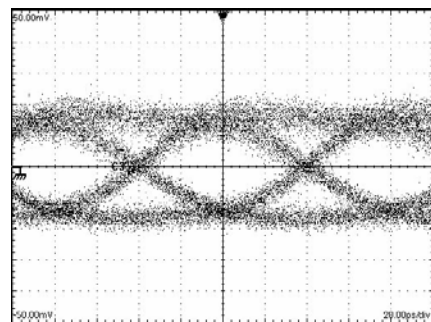
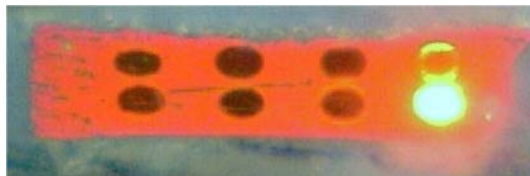


図 4 屈折率分布型コアポリマー並列光導波路 3m の 1 チャンネルを用いて 12.5Gb/s 伝送実験を行った際のアイダイアグラム

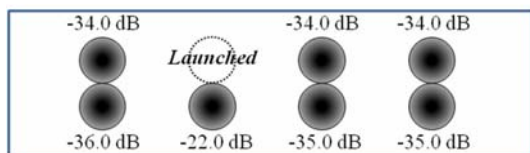
次に、隣接チャンネルへの信号光遷移(クロストーク)の検討結果について示す。クロストークに関して、NFP ならびに実際の強度測定により定性的、定量的に評価を行った。一例として、8 チャンネル GI 型円形コア導波路(コア径 50 $\mu\text{m}$ )の 1 チャンネル(下段、右端)の



みを励振した際の、断面の出射光写真を図 5(a)に、また 1 チャンネル（上段、左から 2 番目）のみを励振した際の、他チャンネルへのクロストークの測定結果を図 5(b)に示す。図 5(b)に示す測定には、コア径  $50\mu\text{m}$ 、横方向ピッチ  $120\mu\text{m}$ 、縦方向ピッチ  $80\mu\text{m}$  のポリマー並列導波路を用いた。波長は  $850\text{nm}$  であり、 $9\mu\text{m}$  コアシングルモードファイバ（VCSEL からのスポット径に近いコア径）で励振、 $50\mu\text{m}$  コアマルチモードファイバを受光用途のプロープに用いた。



(a)



(b)

図 5 (a) 1 チャンネルを励振した際の屈折率分布型コアポリマー並列光導波路断面写真と (b) クロストーク測定結果

図 5(a)からも分かるとおり、2 段配列された上下方向のコアがほぼ接している構造を有している。このため、1 チャンネル励振時であっても、上下方向の隣接コアにのみ若干のクロストークが見られているが、その他のチャンネルへのクロストークは  $-30\text{dB}$  を下回る。この低クロストーク性は、上述したように GI 型屈折率分布による、コア部への光信号の強い閉じ込め効果に起因している。

一方、実際の並列導波路を用いたパラレル光インターコネクションを考えた場合、全チャンネルが異なる信号光を伝送することとなる。そこで、2 チャンネルを同時に励振した際のクロストークについて検討した。その際の NFP 測定結果を図 6 に示す。1 チャンネルのみ励振時には、最近接チャンネルに若干のクロストークが見られるものの、その他のチャンネルから出射光は測定されない。これに対して、1 番目と 3 番目のチャンネルを同時に励振した際には、2 番目のチャンネルのクロストーク光は、理論通り、 $3\text{dB}$  の増大が見られた。しかしながら、定量的な測定結果から、8 つの全チャンネルを同時励振している場合のクロストークは  $-26\text{dB}$  と見積もられ、十分に低クロストークを維持出来ている事が分かる。

このクロストークは、コア部の開口数を最

適化することで、さらなる低減が可能であることが分かった。実験上では、コア径を  $50\sim 100\mu\text{m}$  程度とする場合、開口数が  $0.17$  以上であれば、クロストークは  $-30\text{dB}$  以下に低減できることが分かった。

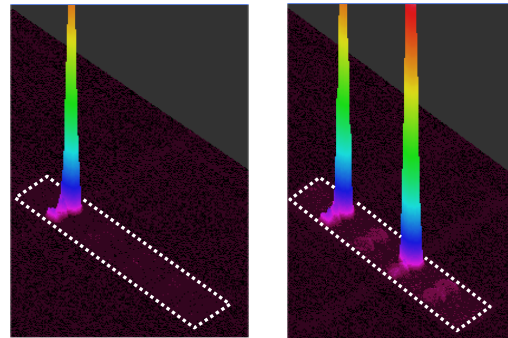


図 6 多チャンネル同時励振時のクロストーク特性の NFP 評価結果(左)1 チャンネルのみ励振 (右)2 チャンネルを同時に励振

これは、コア内の伝搬モード間のモードカップリングの強度に起因することまで分かっているが、母材を PMMA とした場合の実験結果であり、

他のポリマー材料を用いた場合や、コア径が異なる場合に、必ず同じ傾向を示すかは明らかになっていない。このクロストーク低減のための最適開口数については、理論的な考察が今後必要となってくると思われる。

一方、クロストーク低減のためのコア径、並びにピッチ依存性についての検討を行った結果を図 7, 8 に示す。図 7 は、同一のプリフォームから延伸する際に延伸倍率を変えることにより、異なるコア径を有する導波路を数種類作製することで測定を行った。一方、図 8 は、1 つのプリフォーム内に、異なるピッチとなるようにコアを配列して、「コア径は同一 ( $70\mu\text{m}$ ,  $\text{NA}=0.2$ )」となるようにして作製した導波路中で測定した結果である。図 8 より、励振方法に関わらず、ピッチが  $85\mu\text{m}$  以上では、クロストークはピッチに依存しなくなることが分かる。図 7 の測定では、ピッチは、この条件（コア径の約 1.2 倍以上のピッチ）となるように導波路を作製しており、被測定導波路ごとにピッチが異なる影響を取り除くこととした。

図 7 より、 $\text{NA}=0.2$  とした場合の、GI 型円形コアポリマー並列光導波路では、コア径が、 $70\mu\text{m}$  以上では、クロストークは、 $-35\text{dB}$  以下のほぼ一定の値となり、コア径に依存しない。一方、励振スポット径に近いコア径である  $60\mu\text{m}$  では、若干のクロストーク上昇が見られているが、それでも  $-28\text{dB}$  程度にとどまっている。これは、励振スポット径が  $50\mu\text{m}$  であるため、高次モード、漏洩モードに強く結

合しやすくなっているためであると予想される。従って、VCSEL光源を用いて、10 $\mu\text{m}$ 程度の小スポットで励振すれば、50 $\mu\text{m}$ 以上のコア径であっても、極めて低クロストークが実現されると言える。

一方、図8より、狭ピッチ化ポリマー並列光導波路（ピッチ77 $\mu\text{m}$ ）では、励振スポット径の影響を大きく受けていることが分かる。しかし、コア径が70 $\mu\text{m}$ であることを考慮すると、ほぼ2つのコアが外接している状態である。その様なコアであっても、クロストークは-20dB以下、励振スポットが9 $\mu\text{m}$ の場合には、-35dB以下であり、屈折率分布型コアの特徴が十分に発揮されていることが分かる。以上の点、及び導波路実装を考慮して、50~100 $\mu\text{m}$ の範囲でコア径を設計し、開口数を0.2程度設計することが最適であると結論づけた。

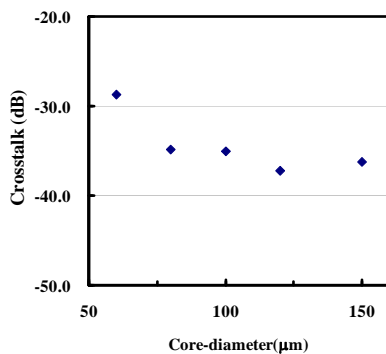


図7 屈折率分布型コアポリマー並列光導波路のクロストークのコア径依存性

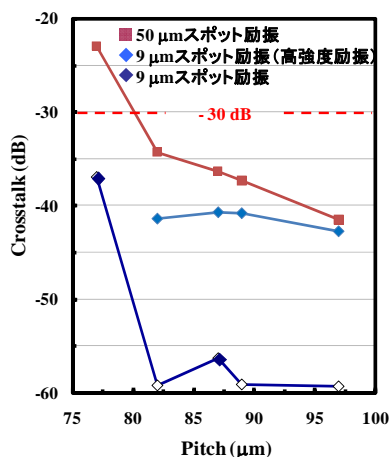


図8 屈折率分布型コアポリマー並列光導波路のクロストークのピッチ径依存性

以上の成果から、本研究で開発した屈折率分布型ポリマー並列光導波路は、現在、期待されながら実用化が進んでいない「ボードレベルの光インターコネクション」技術の実現

へと導くキーコンポーネントになりうると思われる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4件)

1. Y. Takeyoshi and T. Ishigure, “High-density 2 x 4-channel polymer optical waveguide with graded-index circular cores”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, (2009), In Press (査読有)
2. Y. Takeyoshi and T. Ishigure, “Polymer Parallel Waveguide with Circular W-shaped Index Profile Cores”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, no. 22, pp. 1795-1798, (2007) (査読有)
3. Y. Takeyoshi and T. Ishigure, “Densely-Aligned Multi-Channel Polymer Waveguide with Low Inter-Channel Crosstalk”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, no. 19, pp. 1430-1433, (2007) (査読有)
4. T. Ishigure and Y. Takeyoshi, “Polymer waveguide with 4-channel graded-index circular cores for parallel optical interconnects”, *Optics Express*, vol. 15, (9), pp. 5843-5850 (2007) (査読有)

[学会発表] (計 21件)

【国際会議】

1. Y. Takeyoshi, T. Kosugi, Y. Hirobe, and T. Ishigure, “Multi-Channel Polymer Optical Waveguides with Graded-Index and W-Shaped Index Profiles”, Optical Fiber Communication Conference and Exposition 2009 (OFC), San Diego, California, USA, (3/23/2009)
2. Y. Takeyoshi and T. Ishigure, “Densely-Aligned 2 x 4-Channel Polymer Waveguide with Graded-Index Circular Cores and Its Crosstalk Property”, 14<sup>th</sup> Microoptics Conference (MOC’08), Brussels, Belgium, (9/26/2008)
3. T. Ishigure, T. Kosugi, and Y. Takeyoshi, “Graded-index core polymer optical waveguides for high-density and high-speed on-board interconnections”, 34<sup>th</sup> European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC’08), Brussels, Belgium, (9/23/2008)
4. Y. Takeyoshi, K. Matsumoto, and T. Ishigure, “Low-loss 4 x 2 channels polymer optical waveguide with circular graded-index cores for high-density integration on printed circuit boards”, 58<sup>th</sup> Electro Components and Technology

- Conference (ECTC'08), Orland, USA (05/30/2008)
5. Y. Takeyoshi and T. Ishigure, "4-Channel Polymer Waveguides with Parabolic and W-shaped Index Circular Cores for Optical Interconnects", 13<sup>th</sup> Microoptics Conference (MOC '07), Takamatsu, Japan, (10/30/2007)
  6. Y. Takeyoshi and T. Ishigure, "Multi-Channel Polymer Waveguides with Parabolic and W-Shaped Index Circular Cores for High-Speed Optical Interconnections", IEEE LEOS Annual Meeting, Florida, USA, (10/24/2007)
  7. T. Ishigure and Y. Takeyoshi, "12.5Gbps/ch Transmission in Polymer Waveguide with 4-Channel Circular Graded-Index Cores", 33<sup>rd</sup> European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC '07), Berlin, Germany, (9/17/2007)
  8. T. Ishigure and Y. Takeyoshi, "Polymer Waveguide with 4-Channel GI Cores toward High-Speed Optical Interconnects", the Conf. Lasers Electro-Optics (CLEO '07), Baltimore, USA, (5/8/2007)

【国内学会】

9. <依頼講演> 廣部祐介, 小杉友哉, 石樽 崇明, 「GI型およびW型屈折率分布を有するポリマー並列光導波路」, 2009年電子情報通信学会ソサエティ大会, 新潟 (2009/9 予定)
10. <招待講演> 石樽 崇明, 「2x4チャンネルポリマー並列光導波路」, 2009年春季応用物理学関係連合講演会, 茨城 (2009/3/31)
11. 宇野久, 石樽 崇明, 「屈折率分布型ポリマー並列光導波路におけるクロストークのピッチ依存性」, 2009年春季応用物理学関係連合講演会, 茨城 (2009/3/31)
12. <依頼講演> 石樽 崇明, 「屈折率分布型プラスチック光ファイバ・光導波路の光インターコネクションへの応用」, 2009年電子情報通信学会総合大会, 愛媛 (2009/3/18)
13. 武吉 佑祐, 石樽 崇明, 「2x4チャンネルポリマー並列光導波路」, 2008年秋季応用物理学学会学術講演会, 愛知 (2008/9/2)
14. 武吉 佑祐, 石樽 崇明, 「W型屈折率分布型円形コアを有するポリマー並列光導波路」, 2008年春季応用物理学関係連合講演会, 千葉 (2008/3/27)
15. 武吉 佑祐, 石樽 崇明, 「W型屈折率分布型円形コアを有するポリマー並列光導波路」, 2008年電子情報通信学会総合大会, 福岡 (2008/3/18)
16. 武吉 佑祐, 石樽 崇明, 「高速光インターコネクトのためのGI型およびW型円

- 形コアを有する 4chポリマー並列光導波路」, 2007年Optics and Photonics Japan (日本光学会) 講演会, 大阪 (2007/11/27)
17. 武吉 佑祐, 石樽 崇明, 「屈折率分布型円形コアポリマー並列光導波路のクロストーク特性解析」, 2007年電子情報通信学会ソサエティ大会, 鳥取 (2007/9/11)
  18. <受賞記念招待講演> 武吉 佑祐, 石樽 崇明, 「屈折率分布型 4chポリマー光導波路のクロストークおよびスキュー特性解析」, 2007年秋季応用物理学応用物理学学会学術講演会, 北海道 (2007/9/6)
  19. 武吉 佑祐, 石樽 崇明, 「屈折率分布型フレキシブルポリマー並列光導波路」, 2007 高分子学会年次大会, 京都 (2007/5/29)
  20. 武吉 佑祐, 石樽 崇明, 「パラレル光インターコネクトのための屈折率分布型 4chポリマー並列光導波路」, 2007年春季応用物理学関係連合講演会, 神奈川 (2007/3/27)
  21. 武吉 佑祐, 石樽 崇明, 「パラレル光インターコネクションのための屈折率分布型 4chポリマー並列光導波路」, 2007年電子情報通信学会総合大会, 東京 (2007/3/22)

【図書】 (計 1 件)

1. 石樽 崇明, 「光電気実装の最新技術 (第2編, 第三章 3 節 分担)」, シーエムシー出版, p 126-138, 2008

【産業財産権】

○出願状況 (計 1 件)

1. 特許権, 石樽 崇明, 武吉佑祐, 学校法人慶應義塾, 「ポリマー並列光導波路とその作製法」, 特願 2008-43836, 平成 20 年 2 月 26 日(国内)(国外)

6. 研究組織

(1)研究代表者

石樽 崇明 (ISHIGURE TAKAAKI)  
慶應義塾大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 00291162

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし